

На правах рукописи

Пещеренко Александра Борисовна

**БЫСТРЫЕ РАСЧЁТНЫЕ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ МЕХАНИКИ
ГИДРОРАЗРЫВА И КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТА**

Специальность 1.6.9. «Геофизика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва, 2023

Работа выполнена на кафедре прикладной механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ).

Научный руководитель: **Чупраков Дмитрий Арефьевич,**
кандидат физико-математических наук.

Официальные оппоненты: **Головин Сергей Валерьевич,**
доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ), механико-математический факультет, профессор кафедры теоретической механики.

Звягин Александр Васильевич,
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ), механико-математический факультет, профессор кафедры газовой и волновой динамики.

Ведущая организация: Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» (Сколтех).

Защита состоится 21 сентября 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.059.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН) по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, к. 1.

Тел./факс: +7 (499) 137–65–11

E-mail: geospheres@idg.chph.ras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, г. Москва, и на сайте <http://idg.chph.ras.ru/>.

Автореферат разослан
«___» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.059.01
кандидат физико-математических наук
Беккер Сусанна Зейтуллаевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Работа посвящена созданию новых вычислительно быстрых моделей гидравлического разрыва пласта (гидроразрыва пласта, ГРП) и кислотной обработки призабойной зоны пласта (кислотной ОПЗ). Сейчас ГРП делают практически на всех новых скважинах. Добыча из нетрадиционных коллекторов (например, сланцев) невозможна без совместного применения горизонтального бурения и многостадийных ГРП на горизонтальных скважинах (МГРП на ГС). Хотя ГРП и практикуют с 1940-х гг., понимание физики этого сложного процесса началось существенно позднее, чем зародилась сама технология. Понимание процесса ГРП и предсказание его исхода возможны только при физико-математическом моделировании, в основе которого лежат фундаментальные физические законы. Любая модель ГРП, даже самая упрощённая, — это решение сложной сопряжённой задачи разрушения породы на кончике трещины, упругого раскрытия трещины под действием давления жидкости, транспорта в трещине смеси вязкой жидкости и расклинивающего агента (проппанта). Не существует универсальной модели ГРП. Наоборот, развитие нефтегазовой индустрии, новые технологии и истощение запасов углеводородов в традиционных коллекторах постоянно ставят новые задачи перед исследователями, которые занимаются моделированием. Каждая модель является инструментом, созданным для решения конкретной задачи. Неизбежны упрощения, и исследователь обязательно должен следить, чтобы допущения модели оставались применимыми к реальному сценарию.

Модели трещины ГРП эволюционировали от относительно простых (KGD, PKN, радиальной), которые описываются одномерными уравнениями, до численных моделей на сетке, псевдотрёхмерной (P3D) и планарной трёхмерной (PL3D), из которых PL3D является более точной, но более медленной. Продолжаются попытки создания полностью трёхмерных моделей, но коммерческого применения такие модели пока не нашли.

Одна из последних задач моделирования, требующая внимания, — множественные расчёты геометрии трещин ГРП в рамках, например, масштабной модели месторождения: операции ГРП стали настолько рутинными, что часто их рассматривают ещё на этапе планирования разработки. Для таких задач необходимо просчитать несколько сценариев с участием сотен или тысяч трещин за приемлемое в рамках рабочего процесса время. На данный момент выбор достаточно точных моделей, позволяющих сделать такой расчёт, ограничен: KGD, PKN, радиальная модели не описывают рост трещины в высоту, и этот недостаток лишает их предсказания ценности, и широко распространён подход, при котором трещины ГРП на этапе разработки не моделируют, что может привести к ошибкам. Множественные расчёты за короткое время нужны также при мониторинге процесса ГРП в режиме реального времени, при решении обратных задач, при оптимизации дизайна ГРП.

Часть задач моделирования ГРП и ОПЗ находится на стыке дисциплин, что делает их решение особенно непростым. Например, при кислотном ГРП и кислотном ОПЗ, кроме механических явлений, необходимо рассматривать и химические процессы разъедания породы раствором кислоты. Одна из наиболее сложных таких задач — моделирование кислотного ГРП и кислотной ОПЗ в трещиноватых коллекторах: кроме магистральной трещины ГРП и собственно породы, обработке подвергаются естественные трещины в пласте, возникшие задолго до ГРП в результате глобальных тектонических процессов. Необходимо учитывать утечки жидкости в эти трещины, их раскрытие, разрушение связывающего стенки трещины слоя кальцитовых отложений, отклик этих трещин на закачку кислоты. На данный момент разработаны детальные, но вычислительно неэффективные модели класса *discrete fracture*

network (DFN), где свойства каждой трещины задают отдельно, каждую трещину моделируют явно, и быстрые модели, основанные на приближении эффективной среды (двойной пористости и двойной проницаемости), которые более удобны. Что неизбежно при наложении сильных упрощающих предположений, область применимости моделей эффективной среды ограничена. Химические процессы при закачке в трещиноватый пласт кислоты зачастую не рассматривают при моделировании механики ГРП и ОПЗ. В последние несколько лет были созданы модели химического травления стенок трещины, но в этих моделях геометрия трещин, их раскрытие (ширина) не зависели, например, от давления жидкости, то есть эти модели были обеднены с точки зрения механики. В таких задачах требуется шаг в сторону сопряжённого моделирования «физики» и «химии», без которого описать характерные явления при интенсификации добычи из трещиноватых коллекторов нельзя.

Операция ГРП сопряжена с рисками. Один из них — это так называемая перепродавка. После закачки смеси жидкости и проппанта в трещину между устьем и забоем скважины остаётся гидросмесь. Чтобы разместить оставшийся проппант в трещине, производят закачку «чистой» жидкости в объёме, равном объёму НКТ или участка ствола скважины от устья до забоя, в результате чего этот участок «промывается», а в трещину поступает дополнительный проппант. Если объём «чистой» жидкости превосходит необходимый, жидкость попадает в трещину. При этом может произойти вымывание проппанта из приперфорационной области трещины, что иногда ведёт к утрате связи между трещиной и скважиной и низкой производительности стадии. Инженеру важно понимать, как модификации дизайна повлияют на перепродавку, когда она будет вести к потерям и когда о ней можно не беспокоиться. Так как при перепродавке возможно развитие неустойчивости Саффмана — Тейлора («вязких пальцев»), при которой в трещине формируется сложная фрактальная структура из длинных каналов, моделирование требует высокого разрешения — мелкой сетки по пространству и времени. Такое моделирование неосуществимо при ограничениях по времени, характерных для полевых работ. Качественные зависимости формы области перепродавки от параметров дизайна всё ещё необходимы, и получить их можно на основе недавно разработанных точных моделей переноса гидросмеси в трещине, сопряжённых с моделями распространения самой трещины ГРП.

Другая сложность состоит в ограничении роста трещины в высоту. Кроме продуктивного пласта, в интервалах глубины, куда может распространиться трещина, могут встречаться обводнённые зоны, «газовая шапка», пропластки, из которых добывается вода для бытовых нужд. В зависимости от параметров задачи прибегают к тем или иным способам контроля высоты, но далеко не все они предсказуемо результативны, и здесь всегда востребованы новые подходы.

Моделирование ГРП и ОПЗ в целом предоставляет бесконечное множество задач и направлений исследования. В этой работе мы постарались идти вдоль траекторий, определяемых потребностями индустрии, и отчасти в этом, кажется, преуспели.

Цели и задачи работы

Цель № 1: для нужд разработки месторождений разработать симулятор ГРП со временем расчёта порядка 1 мин на 1000 запусков с более точными результатами расчёта роста трещины в высоту, чем в модели P3D, и достоверными (в пределах 10–20 % расхождения с коммерческими P3D, PL3D) прогнозами относительно геометрических размеров трещин.

Задачи: найти подход, который позволит сделать такой симулятор. В рамках подхода распространение трещины должно быть чувствительно к одномерной геомеханике пласта, то есть контрастам минимальных горизонтальных напряжений и коэффициента утечек; верифицировать и валидировать модель, при верификации — сравнить рост в высоту в рамках

новой модели с результатами расчётов P3D и PL3D; оценить скорость расчёта и её зависимость от параметров модели; применить модель к описанию реальных полевых случаев и/или модельных задач, интересных с научной точки зрения.

Цель № 2: добавить к модели распространения трещины ГРП (цель № 1) описание взаимодействия трещин ГРП через поле напряжений.

Задачи: выбрать модель взаимодействия трещи; реализовать её, чтобы она была сопряжена с алгоритмом расчёта геометрии трещин; оценить влияние учёта взаимодействия трещин на скорость расчёта симулятора; сравнить результаты с существующими симуляторами; применить сопряжённую модель к практическим и модельным примерам.

Цель № 3: разработать вычислительно эффективную модель, которая учитывает как химические, так и физические процессы, происходящие во время работ по интенсификации добычи в низкопроницаемых трещиноватых карбонатных коллекторах.

Задачи: выбрать метод представления среды с естественными трещинами так, чтобы он подходил для сильно трещиноватых коллекторов; описать транспорт вязкого флюида в такой системе; дополнить модель уравнением реакции кислоты с карбонатными породами; сравнить различные режимы раскрытия естественных трещин и их влияние на фильтрационно-ёмкостные характеристики трещиноватой породы; оценить влияние роста и снижения давления, вязкости жидкости, концентрации кислоты на фильтрационно-ёмкостные характеристики трещиноватой породы; смоделировать добычу нефти при разных видах мер по интенсификации добычи: с кислотной обработкой и без неё, оценить различия в объёмах добычи.

Цель № 4: при помощи численного моделирования выявить факторы, влияющие на успешность операции ГРП с перепродавкой.

Задачи: выбрать «основной» случай, где будет хорошо виден эффект перепродавки; выделить сценарии ГРП, которые представляют исследовательский интерес; провести подробные численные расчёты на мелкой сетке; проанализировать результаты расчётов; выяснить, насколько результаты расчёта зависят от шага сетки.

Цель № 5: предложить метод гарантированного контроля роста трещины ГРП в высоту.

Задачи: придумать концепцию изобретения; провести численные расчёты, указывающие на гарантированный «захват» трещины.

Научная новизна

1. Впервые получена модель распространения трещины ГРП на основе уравнений механики Лагранжа с асимметричной по длине трещиной.

2. Реализована новая полуаналитическая модель трещины ГРП, позволяющая проводить быстрые расчёты геометрии трещины без использования сетки по пространству; модель верифицирована и валидирована.

3. При помощи полуаналитической модели трещины ГРП исследована зависимость роста трещины в высоту от контрастов коэффициента утечек по вертикали.

4. Впервые создана и валидирована модель сопряжения механики активации естественных трещин с кислотным выеданием стенок во время ОПЗ.

5. С помощью модели удалось воспроизвести наблюдаемое в полевых условиях резкое падение дебитов скважин ввиду закрытия естественных трещин после нагнетания жидкости в трещиноватый коллектор, что делает более понятной физическую природу данного явления и позволяет прогнозировать его масштаб.

6. В результатах моделирования закачки жидкости в трещиноватый карбонатный коллектор удалось отразить падение забойного давления при начале нагнетания раствора кислоты, которое происходит из-за увеличения эффективной проводимости коллектора при разъедании стенок

трещины кислотой.

7. Проведено сопряжённое моделирование распространения трещины ГРП и транспорта гидросмеси в ней с высоким разрешением, достаточным для моделирования локального эффекта перепродавки. Установлены тренды изменения формы области перепродавки при модификации различных параметров дизайна ГРП, полезные на практике.

8. Открыт новый способ гарантированной остановки роста трещины ГРП в высоту за счёт бурения параллельной скважины.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разделы 1 и 2 описывают два подхода к построению быстрых моделей распространения трещин ГРП, которые на момент публикаций по этим работам практически отсутствовали в литературе, если не считать «классические» модели KGD, PKN, радиальную, которые не описывают рост трещины в высоту. Моделирование трещин ГРП в задачах планирования разработки месторождений в Petrel было затруднено: в пределах одного месторождения могут быть тысячи операций ГРП, и проблему решали моделированием одной трещины ГРП в симуляторах на основе P3D или PL3D с последующим использованием этого результата для всех трещин без учёта локальных вариаций одномерной геомеханической модели и различий в дизайне ГРП. Материалы разделов 1 и 2, особенно второго, более богатого, позволяют моделировать ГРП за сотые доли секунды с удовлетворительной точностью и с гарантией физически обоснованного результата. На основе модели, изложенной в разделе 2, создан новый программный плагин в комплексе Petrel. Другая область, в которой возможно использование таких моделей, — это обратные задачи, которые, если решать их при помощи методов оптимизации (например, градиентного спуска), требуют многих расчётов за короткое время, и попытки применения модели к таким задачам уже имели место. Теоретическая значимость результатов, изложенных в этих разделах, такова: в разделе 1 были получены уравнения Лагранжа для трещины ГРП, распространяющейся асимметрично по длине, что обращает внимание на нетипичный подход Био к описанию трещины, который может быть перспективным ввиду его гибкости. Во втором разделе была построена модель на основе алгоритма, который принципиально отличается от традиционных для задач ГРП вычислений на сетке.

Раздел 3 посвящён построению модели отклика трещиноватого низкопроницаемого карбонатного коллектора на закачку жидкости, как неактивной, так и кислоты. Инструмент, созданный при помощи построений этого раздела, не имеет аналогов, так как моделей, которые связывали бы описание сети трещин в пласте и химическую реакцию породы с кислотой, насколько известно из литературы, пока нет. Модель позволила объяснить физику таких явлений, как резкое снижение дебита скважины в начале добычи, которое нередко наблюдают в полевых условиях, а также падение забойного давления при закачке в карбонатный коллектор раствора кислоты. На основе этой модели создан облачный сервис для моделирования трещиноватого пласта. При помощи этого сервиса полевые инженеры могут предсказать поведение забойного давления и дебитов скважин после кислотных обработок и кислотных ГРП, что ранее не представлялось возможным. Теоретическая значимость состоит в сопряжении подмоделей трещиноватого коллектора и кислотной обработки, которое можно развивать и совершенствовать в дальнейшем.

Раздел 4 посвящён проблеме, отношение к которой в индустрии неоднозначно — явлению перепродавки и влиянию перепродавки на производительность скважины. С одной стороны, перепродавка является «локальным» эффектом, свойственным для приперфорационной области скважины, и её моделирование с недостаточным разрешением может в корне изменить картину вблизи забоя. С другой стороны, технически невозможно для инженера каждый раз

моделировать распространение трещины ГРП с перепродавкой на мелких сетках, так как такой расчёт может занимать 10–12 ч. Мы постарались охватить ряд базовых модификаций расписания закачки, таких как выбор жидкости и проппанта, чтобы исследовать, как эти модификации могут изменить результат перепродавки, и знание этих трендов повышает осведомлённость инженера и даёт базу для принятия решений по выбору дизайна ГРП.

Раздел 5 предлагает способ удержания роста трещины ГРП в высоту. Эта проблема постоянно возникает при планировании ГРП, и существуют различные подходы к её решению. Новый способ может показаться радикальным — бурение дополнительной скважины, возможно, не будет всегда экономически рентабельным, зато он даёт гарантированный (по крайней мере, с точки зрения геомеханики) результат.

Положения, выносимые на защиту

1. Впервые получены уравнения механики Лагранжа для трёхмерного асимметричного распространения трещины ГРП.

2. Разработана новая модель распространения трещины ГРП со временем расчёта порядка сотых долей секунды (в 10^2 – 10^4 раз меньше такового для моделей P3D и PL3D) при сохранении точности расчёта длины, высоты и ширины трещины в пределах 10 %. Выявлено, что в условиях неоднородного профиля утечек трещина демонстрирует преимущественный рост в высоту в зону с меньшим коэффициентом утечек.

3. Впервые построена сопряжённая геомеханическая модель кислотной обработки трещиноватого карбонатного коллектора, связывающая механику раскрытия и сдвига естественных трещин с кислотным выеданием их стенок. Численными расчётами показана необходимость учёта обоих процессов в одной модели для объяснения поведения забойного давления и снижения продуктивности в плотных трещиноватых коллекторах.

4. Впервые проведено моделирование перепродавки с учётом транспорта смеси вязкой неньютоновской жидкости с проппантом и распространения трещины ГРП. Моделирование с пространственным разрешением 0.8×0.2 м показало, что геометрия области перепродавки преимущественно зависит от контраста вязкостей жидкости ГРП и жидкости перепродавки, а размер проппанта и скорость перепродавки второстепенны.

5. Открыт новый способ ограничения роста трещины ГРП в высоту за счёт бурения смежной горизонтальной скважины непосредственно над скважиной, выбранной для ГРП. Геомеханическими расчётами показано, что поле пороупругих напряжений, созданное вблизи смежной скважины, приводит к «захвату» трещины ГРП при росте её кончика в высоту.

Личный вклад автора

Автор участвовала в разработке и реализации моделей разделов 1, 2, 3: для раздела 1 мною были выведены уравнения модели Био для трёх обобщённых координат, проведена валидация и верификация модели и получены все результаты раздела. Для второго раздела я выводила часть уравнений модели в сотрудничестве с моим руководителем, занималась верификацией и валидацией модели, исследованием её вычислительной эффективности и писала код для первой реализации модели на языке MATLAB. Для третьего раздела я занималась отчасти численной реализацией 2D модели, исследованием и поиском наилучших подходов к учёту всех физических процессов в модели, также я получила почти все параметрические зависимости (кроме сравнения 1D симулятора с 2D моделью). Для раздела 4 все численные расчёты в PL3D симуляторе (который был создан не мной и не кем-либо из моей группы) были проведены мной, включая графики и визуализацию данных о скважине и прочих параметрах работы. Кроме того, я участвовала в обсуждениях физической природы процессов, которые мы наблюдали по итогам моделирования. В пятом разделе я не была автором идеи изобретения, но проводила численные

расчёты и выводила решения для поля напряжений вокруг системы из двух скважин под давлением. Все публикации по темам настоящей диссертационной работы также были написаны с моим активным участием либо преимущественно мной.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность работы показана при помощи верификации (сверки с аналитическими решениями и решениями в коммерческих программных пакетах) и валидации (сверки с полевыми измерениями) её результатов. Так, модель распространения трещины раздела 1 в предельных случаях M -, \tilde{M} -, K -, \tilde{K} -режимов давала те же результаты, что модель РКН, для которой существуют аналитические решения в этих режимах, во втором разделе верификация позволила сказать, что модель в большинстве режимов имеет точность как минимум 10–20 % и определяет высоту трещины в ряде важных случаев более достоверно, чем P3D; валидация на данных акустического и температурного каротажа привела к заключению, что модель достоверно определяет высоту трещины. В третьем разделе верификация показала границы применимости приближённого 1D-подхода, а также корректность решения 2D уравнения диффузии. Валидация позволила удостовериться, что модель воспроизводит сложные физико-химической природы полевые наблюдения при разработке карбонатных коллекторов. В разделе 4 мы пользовались симулятором ГРП и транспорта гидросмеси, достоверность расчётов которого была показана на этапе его разработки. В разделе 5 при выводе аналитических решений мы сверяли их с приведёнными в литературе для $p_w = 0$ и получали полное совпадение.

Материалы работы были представлены на следующих конференциях:

65-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, 2023); Научно-исследовательский семинар кафедры газовой и волновой динамики МГУ (Москва, 2023); SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition (Абу-Даби, ОАЭ, 2023, заочное участие); Научный семинар Института динамики геосфер РАН (Москва, 2022); International Geomechanics Symposium (IGS) (Абу-Даби, ОАЭ, 2022, заочное участие); 3rd International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application (CouFrac) (Беркли, США, 2022, виртуальное участие); Совместный семинар «Газпромнефть НТЦ» и НГУ «Моделирование в нефтяном инжиниринге» (онлайн-формат, 2022 и 2023); American Rock Mechanics Association (ARMA) Hydraulic Fracturing Community Seminar (онлайн-формат, 2022); 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (онлайн-формат, 2021); SPE Virtual Geomechanics Workshop (онлайн-формат, 2021); SPE Russian Petroleum Technology Conference (онлайн-формат, 2021); 54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (Голден, США, 2020; виртуальное участие); SPE Symposium: Hydraulic Fracturing in Russia. Experience and Prospects (онлайн-формат, 2020); Внутренние конференции ООО «Технологической Компании Шлюмберге» (Москва, Новосибирск, 2019–2023).

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка работ, опубликованных по теме диссертации, списка литературы из 170 наименований, трёх приложений. Общий объём диссертации — 181 страница, включая 80 рисунков и 21 таблицу.

Основное содержание работы

Раздел 1. Полуаналитическая модель трещины ГРП на основе лагранжевой механики

Первый раздел описывает опыт создания новой модели распространения трещины ГРП с малым (сотые доли секунды) временем расчёта. Мы воспользовались подходом, основанным на

записи уравнений классической механики Лагранжа для трещины ГРП в породе. При таком подходе число решаемых уравнений равно числу N степеней свободы системы (обобщённых координат) $\{q_i\}_{i=1}^N$.

Для создания быстрого симулятора, дающего приближительную оценку геометрии трещины, следует, во-первых, упростить сами уравнения Лагранжа $d_t[\partial_{\dot{q}_i}L(q_i, \dot{q}_i)] - \partial_{q_i}L(q_i, \dot{q}_i) = \bar{Q}_i, i \in \overline{1, N}$, где \bar{Q}_i — обобщённые силы, здесь и далее $d_x = d/dx, \partial_x = \partial/\partial x$. Для трещины пренебрегают кинетической энергией T в функции Лагранжа $L(q_i, \dot{q}_i) = T(q_i, \dot{q}_i) - U(q_i)$, диссипативные обобщённые силы представляют в виде $\bar{Q}_i = -\partial_{\dot{q}_i}D(q_i, \dot{q}_i) + Q_i(q_i)$, где $2D(q_i, \dot{q}_i) = -\int_{-L}^L q(\partial_x p) dx$ — диссипативная функция Рэлея. Таким образом, получается система N обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), решение каждого из которых не представляет вычислительной сложности. Система замыкается, если дополнить её законом сохранения массы.

Во-вторых, для быстроты вычислений нужно минимизировать число обобщённых координат N . Новаторская работа М. Био и др. 1974 г. описывает систему из двух уравнений Лагранжа для трещины KGD-геометрии постоянной высоты ($N = 2$): уравнения на полудлину $L(t)$ и уравнения на максимальное раскрытие трещины $w_0(t)$. Высота считалась постоянной. Профиль раскрытия трещины по вертикали и по горизонтали был задан. Если считать профиль $\Omega(x/L)$ раскрытия трещины $w(x/L, t) = w_0(t)\Omega(x/L)$ известным и постоянным, то задачу можно решать только на максимальное или среднее раскрытие, так как раскрытие в любой точке трещины — известная функция координаты.

В-третьих, вычисления упрощаются, если подмодели упругости, течения вязкой жидкости в трещине, утечек и хрупкого разрушения породы на кончике достаточно просты. Их целесообразно выбрать такими: упругость — локальная, $p(x) \sim w(x)$, течение жидкости в трещине подчиняется уравнению теории смазки $q(x) \sim -w^3(x)(\partial_x p)$, утечки — модели Картера $u_L \sim C_L/\sqrt{t-t_0}$, хрупкое разрушение — линейно-упругой механике разрушения, где $\delta A_{\text{surf}} = -G_c \delta S_f = -G_c H(\delta L_1 + \delta L_2)$ — энергия, необходимая для приращения кончиков трещины.

Мы решали аналогичную работе М. Био и др. задачу для трещины PKN-геометрии с важной модификацией: длина крыльев трещины могла быть различной ($L_1 \neq L_2$) из-за влияния переменного вдоль горизонтальной координаты поля сжимающих напряжений $\sigma_h(x)$. Таким образом, у нас было три обобщённых координаты и три ОДУ: на длины «правого» и «левого» крыльев $L_{1,2}(t)$ и на максимальное раскрытие трещины $w_0(t)$, дополненные уравнением неразрывности.

Эта простая модель давала решения, полностью совпадающие с аналитическими для предельных случаев распространения трещины PKN, где $L = L_1 = L_2$, если профиль раскрытия $\Omega(x/L)$ задавать в соответствии с известными решениями для этих предельных случаев, что и позволило верифицировать её.

Модели требовалось около 0.07 с на один расчёт. С её помощью мы исследовали распространение асимметричной по длине трещины в поле напряжений $\Delta\sigma = \kappa L_2$, где $\kappa = \text{const.}$ — градиент горизонтального напряжения, $\Delta\sigma = \sigma_1(L_1) - \sigma_2(L_2)$, $\sigma_1(L_1) = \int_0^1 \sigma_h(\xi, t) d\xi$, $\sigma_2(L_2) = \int_{-1}^0 \sigma_h(\xi, t) d\xi$, а именно — асимметрию трещины $\lambda_L = 100\% \cdot |L_1 - L_2|/(L_1 + L_2)$, получив графики, подобные рисунку 1.

Выводы: при увеличении вязкости жидкости ГРП, модуля Юнга, коэффициента утечек асимметрия снижается, при увеличении градиента горизонтального напряжения, высоты трещины и трещиностойкости $K_{1c} = \sqrt{EG_c}$ асимметрия повышается.

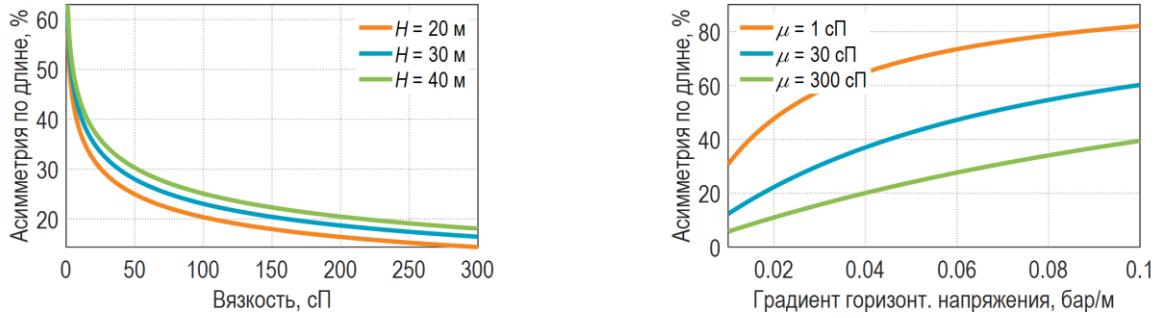


Рисунок 1 — Параметрические исследования асимметрии длины крыльев трещины с применением новой модели на основе механики Лагранжа. По горизонтальной оси указан параметр, в зависимости от которого мы вычисляем асимметрию длины крыльев, при этом другие параметры задачи не меняются.

Модель оказалась быстрой, но привела к громоздким уравнениям, запись и проверка которых уже для трёх обобщённых координат оказалась непростой задачей. Для решения реальных полевых задач понадобилось бы добавить асимметричный рост трещины в высоту ($N = 5$), и эта сложность вынудила нас искать другой способ быстрого моделирования трещины ГРП, чему посвящён следующий раздел диссертационной работы.

Раздел 2. Быстрая расчётная модель распространения трещины ГРП

Другой подход к моделированию трещины ГРП оказался более гибким и простым для реализации. Мы рассматривали трещину ГРП в форме прямоугольного параллелепипеда, ориентированного вертикально, с асимметричной длиной $L_1 \neq L_2$, высотой $h_t \neq h_b$ и эффективной шириной w , связанной с давлением по закону $\langle p - \sigma_h \rangle = \langle E' \rangle w G(L, h)$, где $G \sim (L^\gamma + h^\gamma)^{1/\gamma} / (Lh)$, где $\gamma \approx 1.28$, $2L = L_1 + L_2$, $2h = h_t + h_b$.

Для такой трещины можно записать закон сохранения массы $Q_w = d_t(\hat{V} + \tilde{V})$, где утечки задаются по модели Картера $d_t \tilde{V} = (32/\sqrt{t}) \bar{c}_L L h$, $\hat{V} = 4hLw$ — объём трещины, а Q_w — расход закачки. Зная геометрию трещины и закон утечек, можно получить и объём жидкости, протекающий в единицу времени через поперечное сечение трещины в расчёте на единицу её высоты $q_x(x, z, t)$. Например, для правого крыла трещины $q_x = \left(d_t \int_x^{L_1} w dx \right)_{h=\text{const.}} + \int_x^{L_1} u_L dx$.

Вязкое трение моделируется известным решением для течения вязкой ньютоновской жидкости в канале ширины w с параллельными стенками: $\partial_x p = -(12\mu/w^3)q_x$, $\partial_z p + \rho g z = -(12\mu/w^3)q_z$.

Наконец, критерий разрушения породы на кончике $K_I = K_{IC}$ в приближении для плоского деформированного состояния позволяет сравнить коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_I для каждого из кончиков с трещиностойкостью породы K_{IC} в слое, где находятся верхний и нижний кончик трещины, либо средним по высоте для боковых кончиков трещины. Например, для правого кончика трещины $K_1 = [\Gamma(L/h)/\sqrt{\pi L}] \int_{-L_2}^{L_1} [\langle p \rangle_z(x, t) - \langle \sigma \rangle_z] \times \sqrt{(L_2 + x)/(L_1 - x)} dx$, и трещина будет распространяться вправо, если $K_1(\dot{L}_1) = \langle K_{IC} \rangle$.

Отдельно упомянем подмодель взаимодействия трещин через поле напряжений (stress shadow). Для каждой трещины мы вычисляем по аналитическим формулам для элемента разрывного смещения, известным из классической литературы, компоненту наведённого напряжения σ_{yy} , которое эта трещина создаёт в направлении, перпендикулярном плоскости трещины. Наведённые напряжения от нескольких трещин складываются по принципу суперпозиции. Эти напряжения учитываются в законе упругости и при вычислении КИН для

новой трещины, которая распространяется в поле наведённых напряжений от всех предыдущих.

Используя полученные ранее выражения для давления p и скоростей потоков q и применив кусочно-линейную аппроксимацию к профилю давления, мы можем записать аналитические выражения для КИН $K_{t,b}$ и $K_{1,2}$. На этих выражениях и основана новая полуаналитическая модель.

Для расчёта на каждом шаге по времени $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ мы оцениваем КИН на всех кончиках трещины. Если для некоторого кончика выполняется $K_I > K_{IC}$, кончик получает фиксированное приращение Δh на текущей итерации. Затем КИН пересчитываются с учётом приращения длины крыла либо высоты верхней или нижней части трещины, и только когда для всех кончиков $K_I = K_{IC}$, мы переходим к следующему шагу по времени. Для $\Delta t = 1$ с и $\Delta h = 10$ см расчёт геометрии одной трещины занимает около 0.06 с.

После моделирования распространения трещины мы моделируем закрытие трещины на проппант, который считается равномерно распределённым по всей площади трещины. Для ускорения расчёта в модели не учитывается транспорт проппанта и его влияние на рост трещины.

Верификация модели проводилась путём сравнения решений с аналитическими решениями для предельных случаев распространения трещин KGD-, PKN- и радиальной геометрий, а также с коммерческими симуляторами Pseudo-3D (P3D) и Planar 3D (PL3D); модель наведённых напряжений мы сравнивали с коммерческими симуляторами, которые учитывают взаимодействие трещин. Сравнение с «классическими» моделями трещины показало, что расхождения между новой моделью и аналитическими решениями при оценке геометрических параметров трещины не превосходят 1020 %, расхождение получается большим только для трещин PKN в режиме преобладающей трещиностойкости, который редко встречается на практике и характерен скорее для повторного ГРП и ряда других частных случаев. Сравнение с другими симуляторами, P3D и PL3D, показало, что распространение трещины ГРП в высоту для новой модели лучше согласуется с PL3D, чем P3D, особенно при сценариях, где профиль напряжений сложный и плохо подходит для применения PL3D, так как PL3D даёт точные результаты лишь для трещин, существенно ограниченных по высоте.

Верификация stress shadow сравнением с двумя коммерческими симуляторами (рисунок 2: симуляторы на основе PL3D и UFM — Unconventional Fracture Model) показала, что все три симулятора дают разный результат при оценке геометрии трещин при МГРП на ГС с четырьмя близко (1 м между стадиями вдоль скважины) расположенными стадиями. Все результаты различались как количественно, так и качественно, но были сравнимы хотя бы по порядку величины.

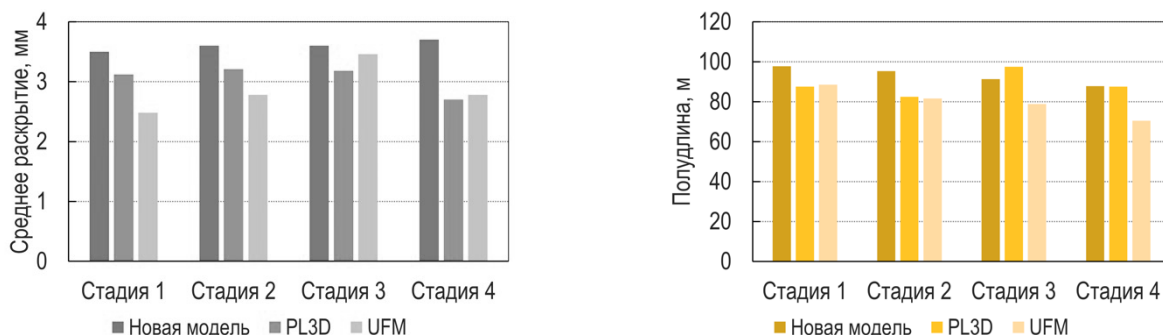


Рисунок 2 — Сравнение результатов симуляции — геометрических параметров трещин по стадиям — для новой модели, PL3D и UFM. Слева — максимальная полудлина, справа — средняя ширина трещины. На каждом графике столбцы сгруппированы по стадиям, цвет соответствует модели.

Итак, новая модель и два коммерческих симулятора ГРП показали разные отклики трещин ГРП на наведённые напряжения. Это можно объяснить различным описанием взаимодействия и

различиями в геометрии трещин. Динамика размеров трещины для новой модели показывает эволюцию, схожую с результатами UFM; различия в размерах трещины в пределах одной стадии, впрочем, не превышают 28 % для ширины трещины и 20 % для длины и высоты.

Затем в разделе приведена валидация модели распространения трещины без наведённых напряжений на данных температурного и кроссдипольного акустического каротажа. Рост модельной трещины в высоту сходится с данными каротажа в каждом из случаев.

Далее в работе мы переходим к рассмотрению примеров применения новой модели как для одиночной, так и для множественных трещин ГРП. Хорошо известно, что в таком случае модель P3D неприменима (рисунок 3) ввиду возникающей при расчёте неустойчивости. Новая модель, наоборот, справилась с этим непростым для симуляции случаем и показала результат роста в высоту, близкий к PL3D, которая достоверно описывает трещину при таком сценарии.

К наиболее интересным результатам раздела 2 можно отнести моделирование распространения трещины в однородном пласте с единственным контрастом свойств — контрастом коэффициента утечек модели Картера C_L по вертикали. В большинстве моделей утечки усредняются на каждом шаге по времени по высоте трещины. У нас профиль $C_L(z)$ учитывается явно при вычислении КИН для верхнего и нижнего кончиков, поэтому есть возможность провести исследование, изображённое на рисунке 4.

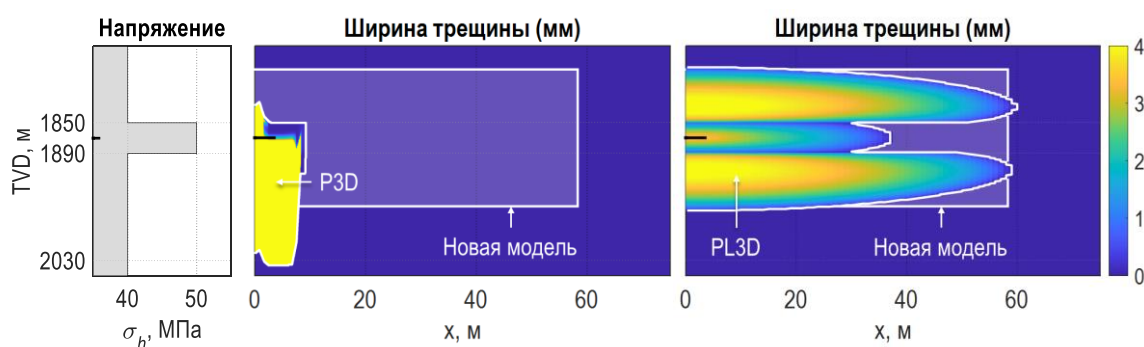


Рисунок 3 — Распространение трещины в трёхслойной среде с высоким сжимающим напряжением в окрестности перфорационного интервала (чёрные отметки на вертикальной оси) с последующим ростом в пропластки с меньшим сжимающим напряжением. Графики показывают наложение результатов симуляции P3D и новой модели (слева) и при помощи PL3D и новой модели для тех же параметров (справа). Время расчёта для новой модели составило 0.08 с, для P3D — 6 мин, для PL3D — 25 с.

Выводы из этого исследования: трещина распространяется больше в пропластки с меньшим коэффициентом утечек; контраст коэффициента утечек может привести к сильной асимметрии трещины по вертикали, даже если остальные свойства породы однородны, поэтому усреднение по вертикали не всегда может давать достоверные результаты.

Ещё один примечательный результат был получен для продольных трещин ГРП. Если горизонтальная скважина пробурена вдоль направления минимального сжимающего напряжения, трещина будет распространяться вдоль ствола скважины. Учитывая, что трещина может распространяться на десятки и сотни метров в длину и что кончик трещины — это концентратор напряжений, можно ожидать, что взаимодействие между трещинами на соседних стадиях через поле напряжений будет велико. На рисунке 5 изображены пять последовательно созданных продольных трещин ГРП на горизонтальной скважине с азимутом 89.9° при расстоянии Δx между соседними интервалами перфорации 50 м (рисунок 5 слева) и 100 м (рисунок 5 справа).

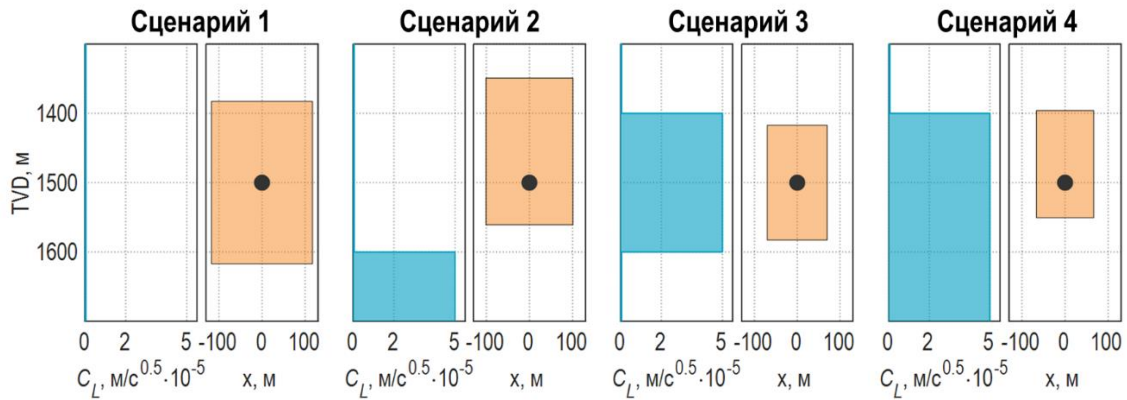


Рисунок 4 — Результаты симуляции распространения трещины ГРП при помощи новой модели в однородной вдоль вертикальной координаты, кроме коэффициента утечек, среде. Параметры закачки были одинаковы во всех случаях.

На рисунке видно, что трещины будут сильно асимметричными по длине. Для симуляции с $\Delta x = 50$ м асимметрия длин крыльев достигает 75 %, в среднем она составляет 50 %. Для $\Delta x = 100$ м асимметрия может достигать 93 %, среднее по всем 50 трещинам ГРП также даёт $\langle \lambda_L \rangle = 50$ %. Реальные трещины в таких условиях, скорее всего, не будут распространяться планарно из-за сильного взаимодействия. Это, в свою очередь, может привести к извилистости трещин, которая затрудняет добычу флюида из пласта. Поэтому, даже если новая модель не даёт достаточно достоверной оценки геометрии трещин, сильная асимметрия крыльев может стать причиной для смены дизайна работы ГРП.

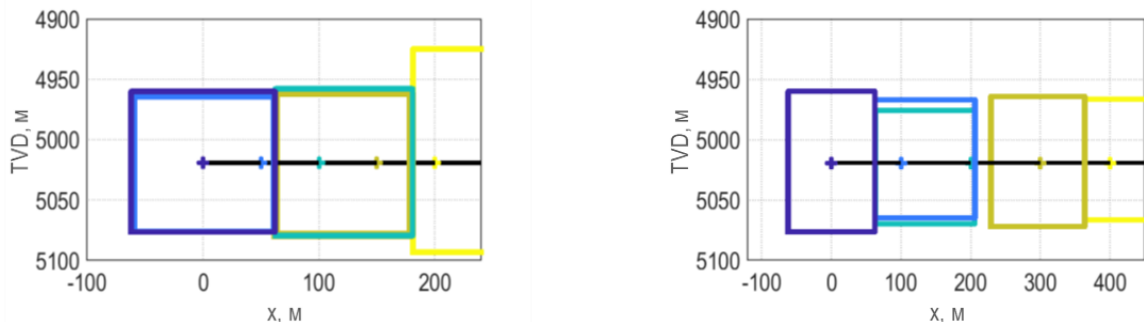


Рисунок 5 — Результаты моделирования 5 последовательных стадий ГРП на горизонтальной скважине, пробурённой в направлении максимального горизонтального напряжения Ox (азимут скважины 89.9°). Слева построены результаты моделирования 5 трещин для дизайна, где расстояние между точками инициации трещин равняется 50 м, справа — 100 м. Фиолетовым обозначена первая стадия, синим — вторая, бирюзовым — третья, жёлто-зелёным — четвёртая, жёлтым — пятая.

Итак, новая модель раздела 2 позволяет симулировать одну операцию ГРП за сотые доли секунды. При это модель описывает асимметричный рост трещины в высоту и по длине, учитывает взаимодействие трещин ГРП, контрасты коэффициента утечек по слоям, причём последнее позволяет использовать модель для исследования распространения трещин в пластах с контрастами утечек, что интересно и с научной точки зрения, так как большинство доступных нам коммерческих симуляторов так или иначе практикуют усреднение коэффициента утечек по вертикали. Модель, лежащая в основе симулятора, основана на фундаментальных физических законах, тех же, на которых строятся более «тяжеловесные» симуляторы типа PL3D. При этом модель имеет преимущество перед широко применяемой до сих пор моделью P3D, так как не демонстрирует неустойчивость в ряде плохо поддающихся моделированию P3D сценариев. Это значит, что поставленная перед нами задача создать быстрый симулятор трещины ГРП, удобный для объёмных вычислений, была выполнена.

Раздел 3. Эффективное моделирование кислотной ОПЗ, кислотного ГРП и добычи в трещиноватых карбонатных коллекторах

Третий раздел содержит построение сопряжённой модели механических и химических процессов, происходящих в низкопроницаемых карбонатных коллекторах с плотными сетками естественных трещин при кислотных ОПЗ и ГРП. Задача требует учитывать как механику отклика естественных трещин на закачку флюида, так и реакцию породы на стенках трещин с кислотой.

Чтобы модель была вычислительно эффективной, мы прибегли к **подходу эффективной среды**: разделили естественные трещины в карбонатном пласте на семейства, каждое из которых характеризуется одним углом азимута трещин θ , их раскрытием до начала работ по интенсификации добычи, характерным размером, коэффициентом трения поверхностей f , пространственной плотностью сетки трещин семейства P_{32} и др. Уходя от явного моделирования трещин, мы сильно выигрываем по времени расчёта, но накладываем ограничения на нашу модель: трещины в породе предполагаются связанными и длинными, а их пространственная плотность — достаточно высокой для гидродинамической связанности всех трещин.

При нагнетании жидкости в трещиноватый пласт может произойти активация естественных трещин за счёт **сдвиговой дилатансии** и увеличение апертуры трещины от величины w_0 до величины w_{cl} :

$$w_{cl} = \begin{cases} \frac{w_0 + u \tan \phi_{dil}}{1 + 9(\sigma_n - p)/\sigma_{ref}}, & p \leq \sigma_n; \\ w_0 + u_{max} \tan \phi_{dil}, & p > \sigma_n; \end{cases} \quad (1)$$

где w_0 — апертура трещины при $\sigma_n - p = 0$, σ_n — нормальная компонента напряжения, действующего на трещину, u — сдвиговая деформация, p — давление жидкости внутри трещины, σ_{ref} — напряжение, необходимое для закрытия трещины на 90 %.

Затем, если давление в системе трещин продолжит расти и превысит σ_n , трещины откроются, и их раскрытие w_{op} можно описать как $w_{op} = (h/\bar{E})(p - \sigma_n)\Theta(p - \sigma_n)$.

Сдвиговая дилатансия необратимо увеличивает проводимость трещин, но механическое раскрытие трещин w_{op} обратимо, что приводит к резкому уменьшению эффективной проницаемости трещиноватого пласта после остановки закачки и при сбросе давления, и это часто наблюдается в полях в плотных карбонатных коллекторах (проницаемость матрицы порядка 0.01 мД).

Кислотная ОПЗ либо кислотный ГРП в карбонатных коллекторах — давно зарекомендовавшие себя методы интенсификации добычи углеводородов, так как карбонатные породы эффективно растворяются под действием раствора кислоты. В нашей модели предполагается, что кислота разъедает стенки естественной трещины и/или магистральной трещины ГРП, также создавая апертуру $w_{ac} = w_{et} \exp[-(C_2/a_2)(\sigma_n - p)\Theta(\sigma_n - p)]$. Этот процесс необратим.

$$\partial_t w_{et} = [2\beta \rho_{ac} k_g (C - C_w)] / [\rho_m (1 - \phi_m)], \quad (2)$$

Здесь w_{et} — апертура трещины, вызванная кислотной обработкой, k_g — коэффициент массопереноса, C — концентрация кислоты в середине трещины, C_w — на стенках трещины, ϕ_m — пористость матрицы, ρ_m — её плотность, ρ_{ac} — плотность раствора кислоты, β — растворяющая способность. Ширина w_{ac} с учётом закрытия каналов при снижении давления вычисляется по модели, C_2, a_2 — параметры модели.

От свойств отдельных трещин мы переходим к свойствам эффективной среды, вычисляя проводимость семейства трещин,

$$kw_k = \frac{1}{12} (\hat{w}_{cl,k} + \hat{w}_{op,k} + \hat{w}_{ac,k})^3, \quad (3)$$

где $\widehat{W}_{cl,k}$, $\widehat{W}_{op,k}$ и $\widehat{W}_{ac,k}$ — гидравлические апертуры трещин, учитывающие их закрытие при сбросе давления, и проницаемость эффективной среды

$$k_{ij} = k_m \delta_{ij} + \sum_{k=0}^N P_{32,k} k w_k(p) f_{ij}(\theta_k), \quad (4)$$

оценивая, наконец, сжимаемость трещиноватого пласта $c(p) = c_t \phi_m + \sum_{k=0}^N P_{32,k} \partial_p w_k$.

Новая модель сводится к двумерному уравнению диффузии давления, которое дополняется уравнением транспорта кислоты и начальными и граничными условиями:

$$c(p) \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial x} k_{xx}(p) \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial y} k_{xy}(p) \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_{yy}(p) \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) — нелинейное анизотропное уравнение диффузии, которое решается относительно давления в системе трещин и матрице p . Начальные условия для давления — $p = 0$ при $t = 0$.

Уравнение переноса кислоты в трещине с площадью поперечного сечения $S_f = hw$, шириной w and и постоянной высотой h :

$$\partial_t(a S_f) + \vec{\nabla} \cdot (a S_f \vec{v}) = -2[q_L a_{\text{walls}} + h k_g (a - a_{\text{walls}})], \quad (6)$$

где a — концентрация кислоты в массовых долях от 0 до 1, a_{walls} — концентрация кислоты у стенок трещины, q_L — объём жидкости, утекающий через единичную площадь трещины в единицу времени, k_g — коэффициент массопереноса и \vec{v} — скорость течения жидкости в трещине.

Так как решение на двумерной сетке всё ещё может быть недостаточно вычислительно эффективным, мы предлагаем способ сведения уравнения диффузии давления к одномерному в предположении эллиптической формы фронта давления. Тогда численное решение уравнения

$$c(p) \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{\mu} \bar{k}_{\text{eff}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0 \quad (7)$$

совместно с уравнением транспорта кислоты после преобразований растяжения/сжатия и поворота даст приближённую оценку давления, зная которое, можно получить распределение проницаемости, пористости и других свойств трещиноватого коллектора в пространстве.

Ограничения одномерной модели связаны с тем, что «оригинальная» двумерная задача (5) одновременно анизотропна и сильно нелинейна. Комбинация этих особенностей задачи сильно снижает точность радиального приближения. В предельном случае распространения флюида вдоль одного семейства трещин в одном направлении модель неприменима.

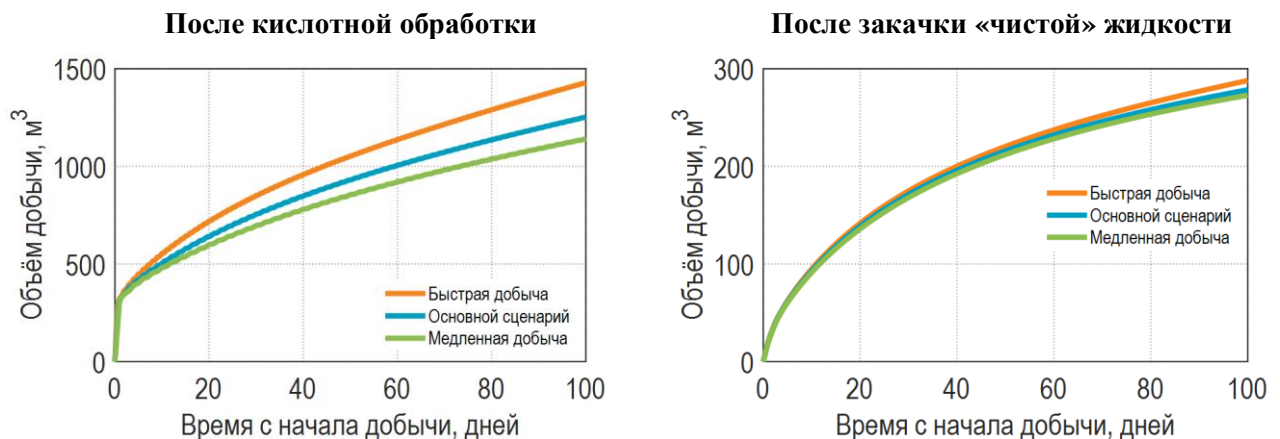


Рисунок 6 — Эволюция объёма добычи от начала добычи до 100 дней для плотного карбонатного коллектора. Слева — после закачки 15 wt% соляной кислоты (HCl), справа — того же объёма «чистой»

(нерактивной) жидкости. Мы моделировали три сценария линейного по времени сброса давления, которым соответствуют цвета кривых: быстрый сброс давления (40 МПа за 100 дней) обозначен оранжевым, медленный (20 МПа за 100 дней) — зелёным, а бирюзовый цвет соответствует среднему (20 МПа за 100 дней) по скорости сброса давления сценарию.

В разделе приводится валидация новой модели сравнением с данными истории забойного давления в процессе кислотной ОПЗ и истории добычи после работ по интенсификации добычи из трещиноватого коллектора. В ходе последнего сравнения мы стремились сопоставить объёмы добычи и добились расхождения между реальными полевыми данными и модельными расчётами примерно в 1.4 %. Оба результата пункта «Валидация» интересны тем, что качественно описывают явления, наблюдаемые в полях при работе с трещиноватыми карбонатными коллекторами: падение забойного давления при поступлении раствора кислоты на забой скважины и резкое падение дебита добычи при сбросе давления в начале добычи. Первое связано с тем, что кислотное разъедание быстро приводит к увеличению проницаемости трещиноватого коллектора вблизи забоя, второе явление вызвано механическим закрытием естественных трещин, которые в открытом состоянии (при закачке под давлением) дают значительный вклад в проницаемость пласта.

Затем мы показываем различные параметрические зависимости для закачки и добычи из трещиноватого коллектора, в том числе сравниваем влияние закачки «чистой» (нерактивной) жидкости и идентичного объёма раствора кислоты в одних и тех же условиях на добычу (рисунок 6). Выясняется, что закачка кислоты вызывает увеличение объёмов добычи в 5 раз большее, чем то, которое можно достичь закачкой нерактивной жидкости.

Раздел 4. Моделирование перепродавки

В четвёртом разделе работы решается задача оценки рисков, связанных с перепродавкой при ГРП. **Перепродавка** происходит, когда часть жидкости продавки попадает в приперфорационную область трещины в ходе проппантного ГРП. Она может привести к образованию обеднённой проппантом области при забое, которая нарушит связь между проводящей частью трещины и скважиной и снизит дебиты добычи или даже сделает добычу невозможной при высоких сбросах давления.

Для этой оценки мы воспользовались уже существовавшим симулятором ГРП с продвинутой моделью транспорта гидросмеси (смеси проппанта и неньютоновской вязкой жидкости) в трещине. Во введении диссертационной работы описаны некоторые уравнения и принципы, на которых основан этот симулятор. Сложность моделирования перепродавки состоит в том, что область перепродавки обычно существенно меньше, чем площадь трещины, и для корректного описания перепродавки нужны очень мелкие сетки по пространству и времени. Это делает расчёт весьма длительным (около 3 ч на сценарий), что исключает встраивание такого моделирования в инженерные процессы, где время на моделирование ограничено. Поэтому нужно понять, как те или иные изменения в дизайне отразятся на исходе перепродавки и дать практические рекомендации для инженеров ГРП. Для этого и была проделана работа четвёртого раздела диссертации.

В работе представлены результаты для семи сценариев ГРП с перепродавкой. Все сценарии мы сравнивали с «основным» сценарием закачки, где в ходе работы используется высоковязкий сшитый гель с эффективной вязкостью (англ. apparent viscosity) около 300 сП, а продавка и перепродавка выполняются линейным гелем вязкостью 20 сП. В этом сценарии мы наблюдали образование области с неустойчивостью Саффмана — Тейлора («вязких пальцев») вблизи перфораций. В призабойной зоне появляются длинные каналы характерной фрактальной формы, из которых вымывается проппант.

Не меняя геомеханических свойств пласта, мы варьировали расписание закачки гидросмеси в трещину ГРП и свойства самой гидросмеси, чтобы понять, насколько сильно тот или иной параметр влияет на фильтрационные свойства призабойной зоны. Большинство изменений дизайна, например, увеличение расхода при перепродавке, не давали существенного изменения геометрии области перепродавки. Оказалось, что основное влияние на форму области перепродавки оказывает контраст вязкостей жидкости-песконосителя ГРП и жидкости перепродавки (рисунок 7).

На рисунке 7 изображена симуляция перепродавки объёмом 5 м^3 ньютоновской жидкостью с вязкостью от 5 до 1000 сП, где жидкость-песконоситель — высоковязкий сшитый гель. Слева, при перепродавке низковязкой жидкостью, формируются длинные «вязкие пальцы». Справа эффективная вязкость гидросмеси в трещине приближается к вязкости жидкости перепродавки, и реализуется сценарий поршневого вытеснения, посередине можно наблюдать промежуточный сценарий. Последний неблагоприятен, особенно на ГС, потому что область, геометрия которой близка к осесимметричной, при сбросе давления с высокой вероятностью закроется на стенки и отделит проводящую часть трещины от перфорации; длинные каналы же не всегда приводят к потере эффективности стадии ГРП.

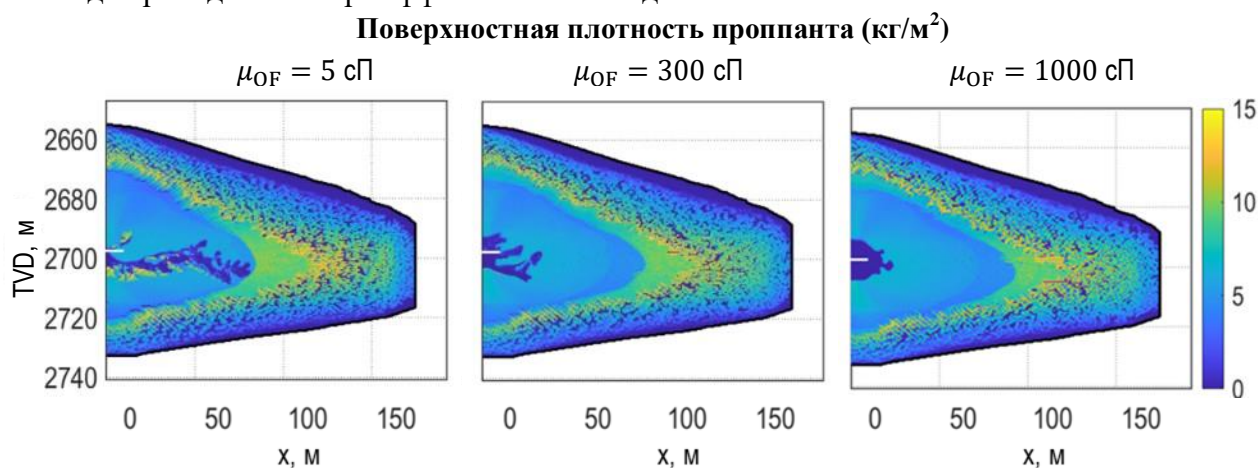


Рисунок 7 — Поверхностная плотность проппанта (в $\text{кг}/\text{м}^2$) после закрытия трещины для сценария 5. Перепродавка 5 м^3 ньютоновской жидкостью с вязкостью от 5 до 1000 сП.

Раздел 5. Способ удержания распространения трещины ГРП в высоту

В последнем разделе диссертации описано изобретение из области нефтяной и газовой промышленности, которое может быть использовано для интенсификации добычи нефти и газа из продуктивных пластов посредством ГРП.

Рост трещин по высоте не всегда желателен, особенно если продуктивный нефтеносный пласт имеет малую мощность и окружён водо- или газосодержащими пропластками. Проникновение трещины в эти пропластки вызывает обводнение скважины либо прорыв газа, что делает скважину непригодной для добычи углеводородов и ведёт к экономическим потерям либо вредит окружающей среде.

Скважины изменяют напряжённо-деформированное состояние породы вокруг себя. Если в пласте пробурены две скважины, то напряжения от них складываются по принципу суперпозиции. На этом основана идея этого изобретения. Предлагается следующая последовательность действий (рисунок 8):

1. Определить верхнюю и нижнюю границы по глубине (TVD) зоны, предназначенной для проведения ГРП (обозначена оранжевой заливкой на рисунке 8), по каротажным, геологическим или сейсмическим данным.

2. Внутри продуктивной зоны на минимально возможном расстоянии от её нижней границы по направлению максимального горизонтального напряжения σ_h пробурить горизонтальную скважину, предназначенную для осуществления ГРП (скважину ГРП).

3. Внутри продуктивной зоны пробурить вспомогательную горизонтальную скважину, параллельную скважине ГРП, на минимально возможном расстоянии от верхней границы продуктивной зоны.

4. Осуществить перфорацию скважины ГРП в вертикальном направлении («идеальным» будет сценарий, изображённый на рисунке 8 по центру).

5. Во вспомогательной скважине поднять давление ниже давления инициации трещин, при этом контролируя устойчивость ствола скважины.

6. Провести ГРП на соответствующей скважине.

Теперь оценим, как отклонения сценария от «идеального» повлияют на эффективность способа удержания роста трещины в высоту. Для поля напряжений вблизи скважины в пороупругой среде существуют аналитические решения. В разделе 5 мы приводим их модифицированную версию. Пусть цилиндрическая скважина пробурена в бесконечном пласте с минимальным напряжением σ_h , максимальным (вертикальным) σ_v и поровым давлением p_∞ . В нашей постановке задачи давление в скважине в момент времени $t = 0$ резко увеличивается с p_∞ до $p_w > p_\infty$, где p_∞ — поровое давление в пласте.

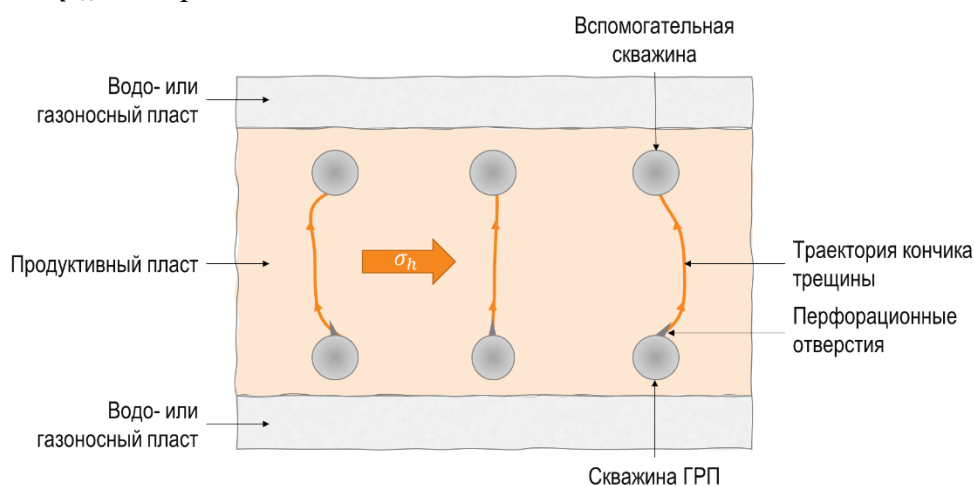


Рисунок 8 — Иллюстрация к предлагаемому методу ГРП с «захватом» кончика трещины, распространяющейся по высоте от скважины ГРП, вспомогательной скважиной. Слева направо показано три варианта распространения кончика трещины.

Задачу о поле напряжений вокруг скважины, где поддерживается давление, решают, выделяя моды нагружения I, II и III. Для каждой моды существуют простые решения. Общее решение получается суперпозицией решений для мод.

Основное допущение наших расчётов состоит в том, что кончик трещины распространяется по направлению максимального растягивающего напряжения σ_{\max} . Таким образом, для определения траектории кончика трещины необходимо найти распределение σ_{\max} в пласте. При помощи выведенных в разделе 5 уравнений можно перейти к главным осям и вычислить величину и направление σ_{\max} . Далее можно найти траектории кончика трещины, построив их в предположении, что они идут вдоль направления σ_{\max} .

В качестве примера было смоделировано распространение трещины из горизонтальной скважины ГРП к горизонтальной вспомогательной скважине при осуществлении ГРП в соответствии с предлагаемым способом. Скважина 1 — это скважина ГРП, скважина 2 — это вспомогательная скважина. До бурения скважин 1 и 2 ось Ox совпадает с направлением

минимального горизонтального напряжения σ_h , Oy — с направлением гидростатического давления σ_v , ось Oz параллельна обоим скважинам и направлению максимального горизонтального напряжения σ_H . Напряжения σ_h , σ_v и σ_H — главные, p_∞ — невозмущённое значение порового давления.

Поле напряжений вокруг скважин представляет собой суперпозицию напряжений до бурения скважин и наведённых напряжений. В результате направление главных напряжений и их значения изменяются. Траектория вершины трещины совпадёт с ориентацией максимального напряжения и не будет прямолинейной, а отклонится в сторону вспомогательной скважины 2.

В первом примере была смоделирована инициация трещины под разными углами, в результате чего мы можем наблюдать эффект захвата трещины скважиной 2 даже при отклонении направления перфорационных отверстий от вертикального (рисунок 9 справа). Рисунок 9 слева иллюстрирует геометрию задачи. Мы считаем, что инициация трещины происходит на расстоянии $r_w + l_p$ от центра скважины 1, где $l_p = 10$ см — длина перфорационного канала. Угол φ , под которым происходит инициация, мы выбирали равным 90° (трещина идёт вертикально вверх от скважины, «идеальный» сценарий), 45° и 180° (трещина начинает расти в горизонтальном направлении). Эти сценарии здесь и далее обозначены чёрной сплошной кривой траектории кончика трещины, штрихованной кривой и пунктирной кривой, соответственно.

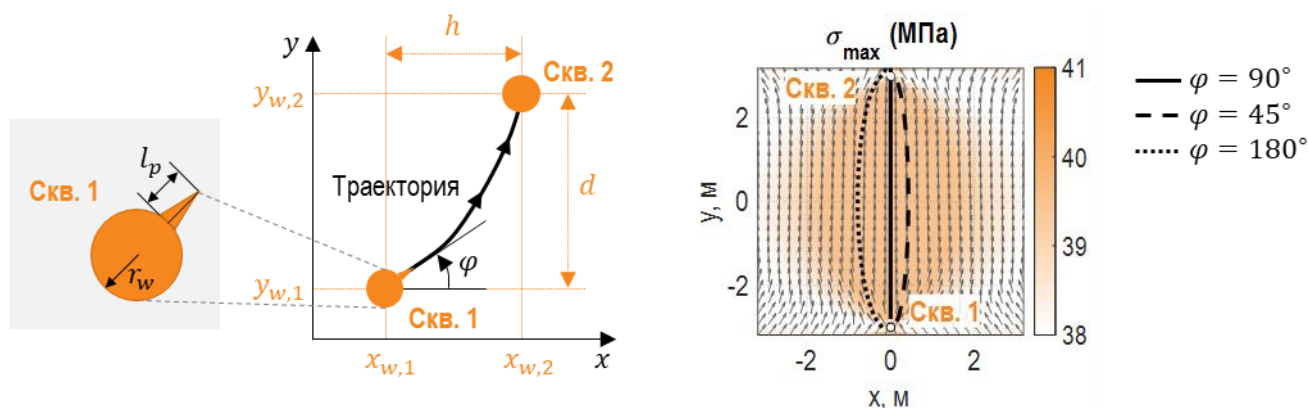


Рисунок 9 — Слева изображена геометрия задачи и пояснены обозначения раздела. Справа показаны результаты симуляции «захвата» кончика трещины и остановки распространения трещины ГРП по высоте. Траектории вершины трещины — чёрные кривые — построены для разных углов инициации трещины ГРП φ : 90° (трещина идёт вертикально вверх от скважины, сплошная линия), 45° (штрихованная линия) или 180° (трещина начинает расти в горизонтальном направлении, пунктирная линия). Цветом показана величина σ_{\max} , стрелки серого цвета показывают направление σ_{\max} .

Если скважина 1 перфорирована строго вертикально (рисунок 9 справа, чёрная сплошная кривая), трещина распространяется вертикально, пока, наконец, не достигнет скважины 2 и не прекратит рост. Если трещина иницируется под углами, отличными от прямого, поле напряжений, создаваемое скважинами, всё равно приводит к распространению трещины в направлении скважины 2 (штрихованная и пунктирная кривые на рисунке 9 показывают случаи возникновения трещины под углами 45° и 180°). Этот пример подтверждает существование эффекта «захвата» трещины, даже если перфорационные отверстия в скважине 1 отклоняются от вертикального направления.

В работе приведены другие примеры, цель которых — исследовать границы применимости нового метода. Итак, мы предложили новый способ контроля роста трещины в высоту при помощи бурения дополнительной скважины и поддержания в ней давления. Поле напряжений, изменённое за счёт этой операции, обеспечит гарантированный «захват» кончика

трещины на вспомогательной скважине, если скважины находятся точно друг под другом ($x_{w,1} = x_{w,2}$ на рисунке 9), причём в таком случае угол инициации трещины не имеет значения. Если скважины находятся на удалении друг от друга по горизонтали ($|x_{w,1} - x_{w,2}| \gtrsim d$), результат приобретает чувствительность к углу инициации трещины φ , а вероятность «захвата» снижается. Вероятнее всего, бурение дополнительной скважины не будет первоочередной мерой контроля распространения трещины в высоту по экономическим причинам, но в ситуациях, когда проникновение трещины в нежелательную зону может повлечь риски для окружающей среды и/или добывающей компании, такая мера будет оправданной.

Заключение

Основные результаты работы, их применение и возможные направления дальнейшего совершенствования выбранных подходов перечислены в этом разделе автореферата.

В разделе 1 построена быстрая (один расчёт длится сотые доли секунды) модель трещины ГРП на основе уравнений механики Лагранжа с тремя обобщёнными координатами: шириной трещины и различными длинами крыльев трещины, что развивает оригинальный подход М. А. Био. Практическое использование подхода Био мы находим затруднительным, так как, несмотря на простоту численного решения получающейся системы ОДУ для нескольких обобщённых координат, которые выбирает сам исследователь при построении модели, аналитические выкладки при включении уже одной дополнительной обобщённой координаты в рассмотрение приводят к крайне громоздким выражениям, проверка правильности записи которых становится отдельной задачей

В разделе 2 построена другая полуаналитическая модель трещины ГРП, в которой трещина представляется прямоугольным параллелепипедом, и решение задачи о её распространении непосредственно даёт эффективные длины крыльев, раскрытие и высоту трещины. Эта модель чувствительна к контрастам напряжений в горизонтальных пропластках, в которых распространяется трещина, а также к контрастам коэффициента утечек по модели Картера, который может сильно варьировать по вертикали, что зачастую не учитывают при моделировании трещин ГРП. Кроме того, модель дополнена описанием взаимодействия трещин ГРП через поле напряжений (stress shadow). Взаимодействие трещин способно, как показало моделирование, приводить к сильным изменениям геометрии трещин и к их асимметрии, в частности, при продольном распространении трещин ГРП (ствол горизонтальной скважины лежит в плоскости трещины) и при близком расположении стадий обычного ГРП. Расчёт при помощи этой модели занимает сотые доли секунды и не замедляется сколь-либо существенно при «включении» взаимодействия трещин, так как классических расчётов на пространственной сетке при построении модели удалось избежать. Модель не призвана заменить более точные симуляторы ГРП, например, основанные на PL3D-моделях, хотя удовлетворительная (10–20 %) точность расчётов по сравнению с коммерческими реализациями P3D и PL3D, причём распространение трещины в высоту с хорошей точностью моделируется там, где модель P3D неприменима.

В разделе 3 мы строим и валидируем достаточно сложную модель, которая сочетает подход эффективной среды применительно к описанию трещиноватого карбонатного коллектора с низкопроницаемой матрицей и транспорта флюида в нём, а также механику активации и разрушения естественных трещин, с моделью химической реакции раствора кислоты с породой на стенках трещин. Новая модель позволяет предсказывать отклик коллектора на нагнетание реактивной (кислоты) или неактивной жидкости, операции технологического отстоя и добычи флюида из пласта. Таким образом, пользователь может напрямую проследить зависимость

результатов добычи от параметров закачки и дизайна ГРП и оценить, как те или иные модификации последних повлияют на добычу. Модель позволила воспроизвести такие наблюдаемые в полевых условиях явления, как резкое падение дебитов скважин при сбросе давления в начале добычи флюида, что происходит из-за механического закрытия естественных трещин в пласте и/или трещины ГРП, а также спад давления на забое скважины при начале закачки раствора кислоты после нагнетания неактивной жидкости. В работе рассмотрен метод сведения двумерных уравнений модели в частных производных к одномерным, что может увеличить вычислительную эффективность симулятора на её основе. Естественным развитием этой модели было бы рассмотрение не двумерной задачи — на данный момент пласт, в котором происходит распространение фронта давления, считается ограниченным по высоте, — а трёхмерной задачи, где пласт является слоистым, причём слои имеют разные геомеханические свойства.

В разделе 4 мы исследуем перепродавку и выясняем, как изменение параметров дизайна ГРП может повлиять на её исход. В этом разделе мы не создаём новые модели, но используем коммерческую модель распространения трещины и транспорта в ней смеси вязкой неньютоновской жидкости и частиц проппанта как инструмент для численных экспериментов. Ранее эксперименты такого рода проводились только для ячеек Хеле-Шоу, в нашей же работе моделировалась «полноценная» трещина ГРП. Так как перепродавка затрагивает область непосредственно вблизи перфорационного интервала, моделирование требовалось проводить с высоким пространственным и временным разрешением (размеры ячеек сетки — десятки сантиметров при длине трещины порядка сотни метров). Каждый из расчётов сценария (в работе рассматривалось 7 сценариев перепродавки) занимал около 10–12 часов. Исследуя таким образом, как отклонения от сценария перепродавки, выбранного «основным», отразится на геометрии области вблизи перфораций, откуда вымывается часть проппанта, мы установили, что возможны два предельных сценария: формирование области неустойчивости Саффмана — Тейлора (т. н. «вязких пальцев») либо область перепродавки, близкая к осесимметричной, результат «поршневого вытеснения» жидкости ГРП более вязкой жидкостью перепродавки. Второй сценарий является крайне неблагоприятным, так как приводит к потере связи между проводящей частью трещины и интервалом перфорации, особенно в случае горизонтальной скважины, первый сценарий возможен без существенной потери дебита скважины. Реализация того либо другого сценария зависит преимущественно от контраста вязкостей жидкости ГРП и жидкости перепродавки и практически не зависит от размера гранул проппанта или расхода закачки жидкости перепродавки. Эти результаты будут полезными для инженеров при оценке рисков и принятии решений относительно дизайна ГРП с возможной перепродавкой, так как будет более понятно, как те или иные изменения дизайна ГРП повлияют на перепродавку. Нами рассматривалось возможное усложнение этой работы путём рассмотрения ГРП с несколькими интервалами перфораций (кластерного ГРП), для которого также не проводились подобные исследования.

Раздел 5 описывает новый метод ГРП, при котором за счёт бурения дополнительной скважины, изменяющей поле напряжений в своей окрестности, гарантируется, согласно геомеханическим расчётам, «захват» трещины ГРП по высоте и удержание её роста в высоту в пределах целевого пласта, что является часто встречающейся в полевых условиях проблемой. Расчёты делались в предположении о том, что траектория кончика трещины совпадает с направлением главных напряжений, на которые влияет поле упругих напряжений двух скважин; дополнение расчётов симуляцией более реалистичного непланарного распространения трещины ГРП стало бы более утвердительным обоснованием эффективности метода.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Работы, индексируемые Scopus

1. Peshcherenko A., Yamborisov M., Belyakova L., Isaev V., Chuprakov D. High-resolution modeling of overflush and its implications for fracture productivity // *Geoenergy Science and Engineering*. — 2023. — P. 211975. / ISSN 2949–8910. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.211975. [В печати].
2. Peshcherenko A., Chuprakov D. An Ultrafast Simulator for 3D Propagation of a Hydraulic Fracture with Rectangular Shape // *Engineering Fracture Mechanics*. — 2021. — № 243 (January). — P. 107512. / DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107512.
3. Peshcherenko A., Bekerov I., Chuprakov D., Abdrazakov D. Fast-Running Model for High-Volume Hydraulic Fracturing // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. — 2022. — № 213. — P. 110430. / DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110430.

Патент

1. Способ гидроразрыва пласта : пат. 2772626 Рос. Федерация. № 2021113587 ; заявл. 13.05.21 ; опубл. 25.05.22.

Прочие публикации по теме диссертации

1. Peshcherenko A., Anisimov M., Chuprakov D. Effective Modeling of Stimulation and Production Decline From Tight Naturally Fractured Carbonate Reservoirs // *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition*. — 2023. — P. 212681. ISBN 978-1-61399-973-8 / DOI: 10.2118/212681-MS.
2. Chuprakov D., Belyakova L., Glaznev I., Peshcherenko A. High-Resolution and Multimaterial Fracture Productivity Calculator for the Successful Design of Channel Fracturing Jobs // *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. — 2021. — P. 206654. ISBN 978-1-61399-830-4 / DOI: 10.2118/206654-MS.
3. Peshcherenko A., Chuprakov D. Ultrafast Simulations of Asymmetric Fracture Growth in Length and Height using Lagrangian Mechanics // *SPE Symposium: Hydraulic Fracturing in Russia. Experience and Prospects*. — 2020. P. 203887. ISBN 978-1-61399-792-5 / DOI: 10.2118/203887-MS.
4. Peshcherenko A., Chuprakov D. The Lagrangian Mechanics of Two-Dimensional Asymmetric Hydraulic Fracture Propagation // *54th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. — 2020. — Vol. 1 — P. 2172–2186. ISBN 978-1-7138-1890-8. ARMA 20–1362.